第37卷 第6期
2020年11月
干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH
Vol. 37 No. 6
Nov. 2020

巩乃斯河谷地带地表土壤水分和电导率的分布特征

冯 挺[1,2,3]， 黄法融[1,3,4,5]， 郝建盛[1,2,3]， 李兰海[1,2,3,4,5]

（1. 中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830011；2. 中国科学院大学，北京 100049；3. 中国科学院伊犁河流域生态系统研究站，新疆 新源 835800；4. 新疆干旱区水循环与水利用重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830011；5. 中国科学院中亚生态与环境研究中心，新疆 乌鲁木齐 830011）

摘 要：土壤水分和土壤电导率是影响植被生长和农业发展的重要因素，传统方法测量土壤水分和土壤电导率成本高，导致当前缺少基于实测资料的这两种土壤变量在山区流域不同空间尺度下的研究。本研究利用地表土壤水分和电导率实测数据，应用统计学方法，分析了天山西部巩乃斯河谷地带不同空间尺度下秋季地表土壤水分和地表土壤电导率的分布特征及其影响因素。结果表明：（1）在巩乃斯河谷，流域尺度地表土壤水分随海拔的升高而显著（$P<0.01$）增加，增加速率为每公里10%，但在阿拉图拜小流域，地表土壤水分随海拔的升高先上升后降低；流域尺度平均地表土壤电导率为17.51 mS·m^{-1}，表层土壤整体上不存在盐碱化，但2000～2500 m海拔范围内部分点的电导率大于35 mS·m^{-1}，为轻度盐渍化；坡地尺度下，不同坡向地表土壤水分和电导率均存在较大差异，阴坡地表土壤水分（均值：44.22%）>阳坡（均值：22.83%），阳坡地表土壤电导率（均值：8.33 mS·m^{-1}）>阴坡（均值：4.58 mS·m^{-1}）；（2）随空间尺度增大，影响土壤特性的环境要素更加复杂，地表土壤水分与地表土壤电导率关系逐渐变弱；（3）不同土地利用类型的地表土壤水分依次为：草地（均值37.19%）>耕地（均值37.04%）>林地（均值34.67%），地表土壤电导率依次为：耕地（均值17.36 mS·m^{-1}）>草地（均值14.95 mS·m^{-1}）>林地（均值13.81 mS·m^{-1}）。在海拔、坡向、土地利用类型的影响下，巩乃斯河谷地带地表土壤电导率和土壤水分均呈中度变异。本研究有益于巩乃斯河流域水土资源合理利用及生态环境保护。

关键词：地表土壤水分；地表土壤电导率；空间分布；巩乃斯河流域

土壤水分和土壤电导率是土壤的两个重要属性，从一定程度上影响土壤的生产性能和土壤环境质量[1]，例如土壤电导率与土壤盐渍化、土壤肥力质量、土壤污染密切相关[2]。此外，土壤水分对土壤-植物-大气三个界面物质和能量交换过程有重要调控作用[3]，直接影响土壤水势、蒸散和生态系统的生态水文过程[4]。因此，研究土壤水分和土壤电导率分布特征对区域水土资源管理和生态环境建设具有重要意义。

在一系列的自然和人为因素影响下，土壤具有高度的空间变异性[5]，土壤理化性质的空间分布呈缀块型或梯度格局[6-7]。土壤水分和土壤电导率是土壤重要的理化性质，目前对于两者空间分布特征的研究主要分为两类。第一类单独针对土壤水分或土壤电导率，一般采用地统计学和经典统计学方法研究土壤水或电导率的空间变异性。例如，宗路平等[4]利用哈尼梯田表层土壤水实测数据，采用经典统计学和地统计学方法分析了哈尼梯田水源区旱、雨季土壤水分的空间变异特征，结果表明研究区内土壤水分具有高度空间自相关性，土壤水分含量主要受土地利用、降水以及地形影响；张泉等[8]利用实测数据，采用经典统计学和地统计学方法，分析了祁连山地区高寒草甸的土壤水分的垂直变异特征、水平空间异质性以及分布特征，结果表明研究区内土壤水分与微地形关系密切，与高程、距离溪流的远近程度均有密切关系；柴晨好等[9]利用经典统计学、地统计学与GIS技术相结合的方法，对比分析新疆阜康三工河流域内两大水库周边土壤盐分的空间变异性，结果表明研究区内土壤盐分均呈现中等强度的空间自相关性，土壤盐分主要受人为

收稿日期：2020-05-09； **修订日期：**2020-07-24
基金项目：新疆维吾尔自治区重点实验室开放课题（2017D04010）
作者简介：冯挺（1996-），男，硕士研究生，研究方向为积雪生态水文. E-mail: fengting18@mails.ucas.ac.cn
通讯作者：黄法融. E-mail: huangfr@ms.xjb.ac.cn

活动以及微地形、气候、地下水位等因素影响；尹辉等[10]利用实地监测的土壤电导率数据，采用经典统计学和GIS技术研究了广西果化岩溶区土壤电导率的空间变异特征，结果表明研究区内土壤电导率空间分布主要呈弧状、条带状和斑状分布，这主要受植被覆盖度、地质背景和石漠化程度的影响。第二类将土壤水分和土壤电导率包含在土壤理化性质的空间分布特征研究中。例如，王建栋等[11]利用土壤密度、pH、电导率实测数据，采用经典统计学方法分析了黑河流域不同植被覆盖度条件下土壤理化性质的分布特征，结果表明，该地区土壤电导率大小为下游 > 中游 > 上游；安富博[12]等利用实验室测定的土壤pH、有机质含量、电导率等数据，采用统计学方法分析了甘肃河西走廊不同类型戈壁土壤的理化性质，结果表明该地区土壤电导率与戈壁类型有密切关系，受地下水埋藏深度影响较大；刁二龙[13]等利用实验室测定的土壤含水量、pH、有机质和电导率数据，采用统计学方法，研究了祁连山南坡5种不同植被类型下的土壤理化性质及其空间变异性，结果表明不同土地利用方式会影响土壤理化性质的垂直分异，土壤含水量、有机质和电导率有较强的空间变异性，而土壤pH空间变异性较弱。这些研究对土壤水分和电导率的测定方式大多为野外采样后运回实验室进行处理，在区域尺度上开展土壤水分和电导率研究时，这种方法成本高，导致当前学者仅利用有限实测样点资料开展了相关研究，鲜有学者基于实测资料分析不同空间尺度的土壤水分和电导率分布特征。在地形复杂的山区，为了分析土壤水分和电导率的空间差异，需采集大量的样点资料，更是限制了这种方法的应用。而便携式仪器体积小巧、反应迅速、操作便捷，在采集数据中具有快速高效的特点，可大幅度节省传统方法中采样和实验室处理的时间成本和人力成本；相较于传统实测方法，便携式仪器在区域尺度和山区有较大的优势。

巩乃斯河流域位于天山西部，山地广布，地形复杂，属新疆最大内陆河伊犁河的上游，研究该地区土壤理化性质对新疆水土资源管理和生态环境建设具有重要意义。已有学者基于传统实测方法分析了该地区的土壤养分空间分布特征以及不同植被类型条件下土壤养分的差异。例如，马杰等[14-15]利用野外采样和室内测定数据，采用统计学方法分析了巩乃斯河流域不同草地类型的土壤养分及其空间异质性，结果表明该地区不同草地类型的土壤氮、磷含量存在较大差异，土壤养分空间差异主要与土壤深度、海拔高度相关。但未有学者分析该地区土壤水分和电导率在不同空间尺度下的分布特征。

本文将以天山西段巩乃斯河谷地带海拔跨度约2200 m的土壤为研究对象，使用便携式仪器采集地表土壤含水量和电导率数据，并通过地统计学方法分析这两种土壤属性的空间分布特征，旨在揭示该地区土壤水分和电导率空间异质性的影响因素，以期为巩乃斯河流域生态水文研究、水土资源合理利用及生态环境保护提供科学依据。

1 材料与研究方法

1.1 研究区概况

巩乃斯河位于新疆伊犁河谷上游区域(图1)，是伊犁河三大支流之一，发源于天山山脉的阿吾拉勒山以及依连哈比尔尕山的交界处，河源区海拔超过3500 m；河流自东向西流入伊犁州新源县，主流在巩乃斯种羊场西部与特克斯河汇合后，又与喀什河在雅马渡汇合，之后注入伊犁河。巩乃斯河全长258 km，集水面积4123 km^2，多年平均流量50.4 $m^3 \cdot s^{-1}$，属于季节性融雪型河流，径流量年际变化不大[16-17]。

根据美国地质测量局(USGS)DEM数据，巩乃斯河流域东高西低，海拔跨度为700～4403 m(图1a)；东、南、北三面皆为山脉，形成向西敞开的河谷。巩乃斯河流域属于温带大陆性半干旱气候区，年降水量270～880 mm之间，降水空间分布不均，整体来说山区降水量大于平原，且降水随高程的增加而增加；年平均气温6～9 ℃，气温空间差异较大[18]。根据中国5 a间隔陆地生态系统空间分布数据集(http://www.geodoi.ac.cn/WebCn/doi.aspx?Id=177)2010年数据[19]，研究区土地覆盖类型以草地、林地、农田为主(图1b)，沿巩乃斯河谷，阴坡一般为林地，主要植被为云杉，阳坡一般为草地，以山地草原和草甸为主，草地类型垂直地带性明显。

1.2 数据

本研究使用的温度、土壤水分及土壤电导率数据均来自2019年9月18—21日野外现场测量，测量时段内天气均为晴天。温度、土壤水分及土壤电导

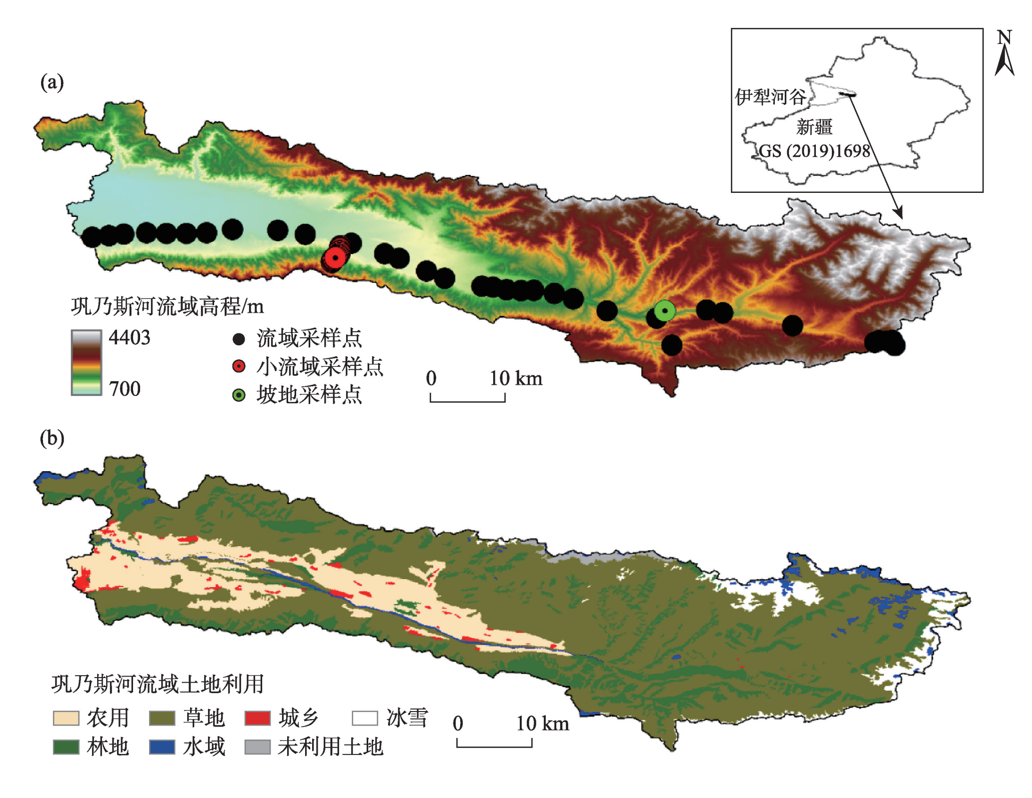


图1　巩乃斯河流域高程和采样点分布(a)及土地利用类型(b)

Fig. 1　Distribution of elevation and sampling points (a) and land use type (b) in Kunes River Basin

率测量工具为我国山东恒美电子科技有限公司生产的HM-WSYP型便携式土壤温度水分盐分(电导率)PH速测仪,其中温度、土壤水分及土壤电导率的测量范围分别为:-40 ~ 100 ℃,0 ~ 100 %,0 ~2000 mS·m^{-1}。野外测量时将仪器金属探针部分全部垂直插入土壤中等待至读数稳定后进行记录,每个测量点共进行三次重复测量。所用仪器探针长度约6.8 cm,测量的土壤水分和土壤电导率代表了地表垂直向下0 ~ 6.8 cm范围内土壤水分和土壤电导率的平均值,本文表述为地表土壤水分(SW)和地表土壤电导率(EC);由于测量仪器温度感应单元在非探针部分,测得的温度表示了地表温度(ST)。此外,对每个测量点,使用手持式GPS测定其经纬度及海拔高度,并记录其土地利用类型。

为了探究研究区地表土壤水分和土壤电导率的空间分布特征,并考虑实地测量的可行性,在研究区内沿河谷共采集了145个点的地表土壤水分和电导率数据。根据空间尺度不同,实地测量的数据分为三个空间尺度:(1) 流域尺度:即新源县-那拉提-艾肯达坂,海拔范围在780~3050 m,高差大约2200 m;(2) 小流域尺度:阿拉图拜小流域,位于那拉提镇和新源县之间山地中的一条山沟,共测得29个样点,数据测量点高差约为400 m,地形复杂,流量较小;(3) 坡地尺度:位于中国科学院天山积雪雪崩研究站旁边的阴坡和阳坡,阴坡的主要植被为云杉,坡度约为30°,海拔1714 ~ 1820 m,相对高度106 m,每隔4 m进行测量,共测得样本27个;阳坡主要植被为草地,坡度约为40°,海拔1728 ~ 1820 m,相对高度92 m,共测得样本20个。在流域和小流域尺度,范围较大、地形复杂,各点测量时间不一,测得的地表温度受气温日变化影响大;而在坡地尺度,各点实地测量时间差异小,测得的地表温度受气温日变化影响小;所以本文只在探究不同坡向地表土壤水分差异时利用了地表温度数据。

1.3　数据处理及分析

样点SW、ST、EC数据采用3次重复测量的算术平均值,并应用经典统计学方法对数据进行描述性统计,例如应用变异系数*Cv*分析SW、ST、EC的空间变异性。

2　结果与分析

2.1　流域地表土壤水分和电导率空间分布特征

流域尺度地表土壤水分变化范围是26% ~

79.33%(表1),平均值为43.54%,土壤含水量平均值偏高,这是因为实地测量之前的9月16日研究区出现暴雨事件,且流域植被条件好、蓄水能力强,导致表层土壤含水量处于较高水平。流域海拔范围为700~3010 m,相对高度约2300 m,将700~3010 m分为5个海拔范围:700~1000 m,1000~1500 m,1500~2000 m,2000~2500 m,2500~3010 m。五个海拔范围地表土壤水分的统计值如表1所示,各海拔范围内地表土壤含水量平均值大小依次为2000~2500 m(56.21%)>2500~3010 m(52.60%)>1500~2000 m(40.59%)>1000~1500 m(37.45%)>700~1000 m(32.73%)。由图2可知,地表土壤含水量随着海拔的升高呈现先上升后下降的趋势,海拔在2000 m以下时地表土壤水含量的增加较为平缓,2000 m以后增加较快,在海拔2000~2500 m内达到峰值,之后缓慢下降。对流域尺度地表土壤含水量和海拔高度进行线性回归得出图3,其中相关系数R为0.66($P<0.01$),说明两者存在显著的正相关关系;R^2值为0.44,说明在该回归关系中,海拔高度的变化可以解释地表土壤含水量44 %的变异。因此,在本研究区中,海拔高度是影响地表土壤含水量变化的主要原因之一。在采样过程中发现,海拔增加至2000 m以上时,土壤表面存在局部积水的情况;海拔增加至2500 m以上时,地面存在正在融化的积雪。高海拔处积雪融水及地表水向下游汇流,海拔越高气温越低导致地表蒸散越小,进而导致地表土壤含水量随海拔高度的上升而上升,地表土壤水分与海拔显著正相关。

由表1得知,5个海拔范围地表土壤含水量的变异系数分别为12%、16%、29%、20%、16%。变异系数可以反映数据的离散程度,当变异系数≤10%时为弱变异性,10%<变异系数≤100%时为中等变异性,变异系数≥100%时为强变异性[20]。五个海拔范围地表土壤水含量的变异系数在12%~29%之间,变异程度均属于中等变异。变异程度也随着海拔高度的上升先增加后减小,其中1500~2000 m海拔范围的地表土壤含水量变异程度最高,700~1000 m的地表土壤含水量变异程度最低,这是因为海拔700~

表1 流域尺度地表土壤含水量在不同海拔范围内的统计特征值

Tab. 1 Statistical characteristics of surface soil moisture in different elevation zones in Kunes River Basin

海拔/m	样本数/个	最小值/%	最大值/%	平均值/%	标准差	*Cv*
700~1000	10	27.33	40	32.73	3.85	0.12
1000~1500	18	26	46.33	37.45	5.96	0.16
1500~2000	17	31	79.33	40.59	11.57	0.29
2000~2500	14	36	76	56.21	11.2	0.2
2500~3010	10	39	69.67	52.6	8.5	0.16

注:*Cv*表示变异系数。下同

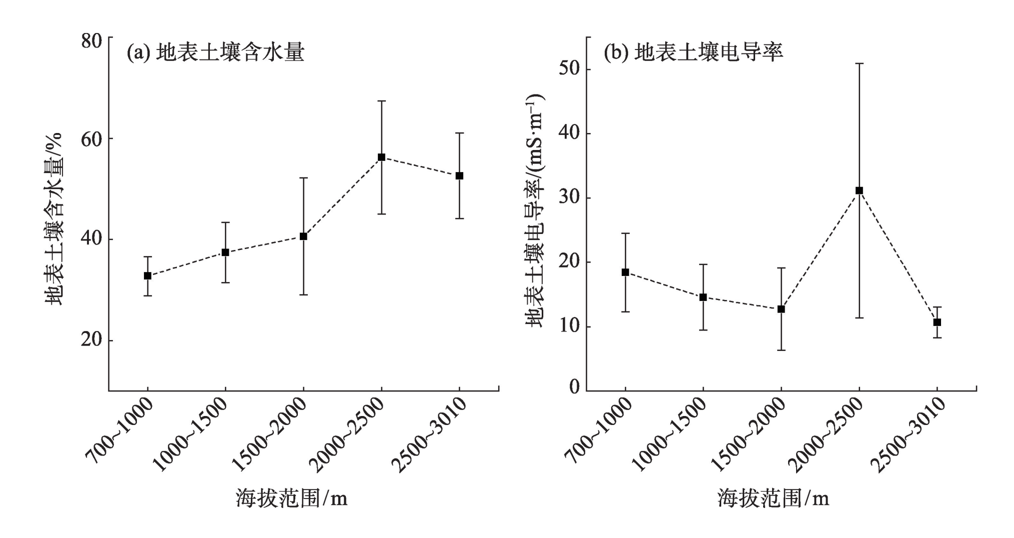


图2 流域尺度不同海拔范围内地表土壤含水量(a)和电导率(b)

Fig. 2 Surface soil water content (a) and electrical conductivity (b) at different altitudes at watershed scale

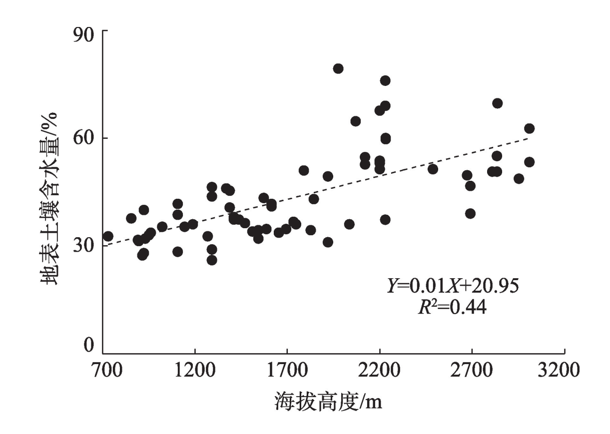


图3　流域尺度地表土壤含水量与海拔关系

Fig. 3　Relationship between surface soil moisture and elevation in Kunes River Basin

1000 m的区域处于河谷平原地区,地形相对平坦土壤条件比较均一,而随着海拔高度的增加,坡度增加,地形条件逐渐复杂,导致海拔较高地区地表土壤水含量的变异程度较大。

各海拔范围地表土壤电导率平均值大小依次为:2000~2500 m(31.16 mS·m^{-1})、700~1000 m(18.43 mS·m^{-1})、1000~1500 m(14.59 mS·m^{-1})、1500~2000 m(12.71 mS·m^{-1})、2500~3010 m(10.67 mS·m^{-1})。海拔小于2000 m时,地表土壤电导率随海拔增加缓慢下降,而在2000~2500 m时地表土壤电导率迅速升高,之后在2500~3010 m内降至最低。流域尺度下地表土壤含盐量(可由电导率值反映)会随着河流走向从上游向下游增大[21],本研究中除2000~2500 m范围内地表土壤电导率值高于其他海拔范围外,其余海拔范围地表土壤电导率也呈现流域高海拔上游地区向低海拔下游地区增加趋势。而在2000~2500 m海拔范围内,两处采样点由于采样时较为靠近河流,地表土壤水含量较高且地势较为平坦,导致土壤表层盐分聚集性较强,地表土壤电导率数值较其他采样点高,导致该海拔范围内地表土壤电导率最高且其变异系数高达0.63。各海拔范围地表土壤电导率变异系数大小依次为:2000~2500 m(0.63)、1500~2000 m(0.50)、1000~1500 m(0.35)、700~1000 m(0.33)、2500~3010 m(0.22)。地表土壤电导率的变异程度均为中等变异,但地表土壤电导率的变异程度远远大于地表土壤含水量的变异程度。地表土壤电导率是反应土壤全盐量的重要指标,根据陈丽娟等人[22]整理的土壤盐渍化分级表,当0 mS·m^{-1}<EC<35 mS·m^{-1}时,土壤为非盐渍化土,当35 mS·m^{-1}<EC<91 mS·m^{-1}时土壤为轻度盐渍化土。流域尺度,除2000 ~ 2500 m海拔范围内两处采样点地表土壤电导率数据大于35 mS·m^{-1}、小于91 mS·m^{-1}之外,其余采样点地表土壤电导率均处于较低水平(图4),不存在土壤盐渍化现象。

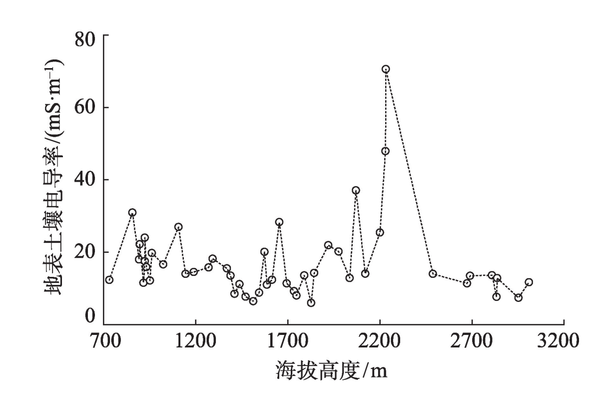


图4　流域尺度地表土壤电导率与海拔关系

Fig. 4　Relationship between surface soil electric conductivity and elevation in Kunes River Basin

2.2　阿拉图拜小流域地表土壤含水量和土壤电导率空间分布特征

阿拉图拜(二区)小流域实地测量海拔范围为1145~1548 m,其地表土壤含水量平均值为38.52%,变异系数为0.15(表2),属于中等变异。根据图5a,二区小流域的地表土壤含水量随海拔的变化趋势为先下降后上升,中海拔地带的地表土壤含水量略低于低海拔和高海拔地带,这是因为在二区海拔范围内,高海拔地带降水高于中海拔地带[23],导致前者地表土壤水分较高;而低海拔的土壤水分由中海拔和高海拔处汇流而来[24],土壤水分较高。二区小流域地表土壤电导率的平均值为15.34 mS·m^{-1},变异系数为0.39,属于中等变异。由图5b可以看出,二区小流域的地表土壤电导率随海拔高度的升高呈下降趋势,下降趋势通过了10%水平显著性检验,但未通过5%水平显著性检验。

表2　阿拉图拜小流域地表土壤水分和电导率的统计特征值

Tab. 2　Statistical characteristics of surface soil moisture and electric conductivity in Alatubai Watershed

	样本数	最小值	最大值	平均值	标准差	*Cv*
SW/%	29	29.00	52.00	38.52	5.83	0.15
EC/(mS·m^{-1})	29	5.50	30.43	15.34	5.94	0.39

注:SW表示地表土壤水分;EC表示地表土壤电导率。下同。

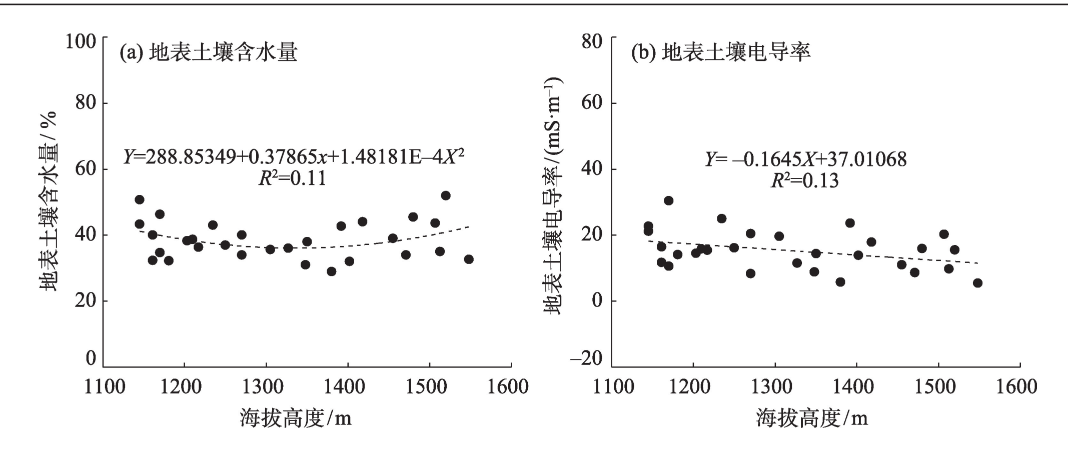


图5 小流域尺度地表土壤水分和电导率与海拔关系

Fig. 5 Relationship between surface soil moisture, electric conductivity and elevation in Alatubai Watershed

2.3 不同坡向地表温度、地表土壤含水量和电导率的差异性

由图6可知,阴坡的地表土壤含水量明显高于阳坡,阴坡的地表土壤水含量沿海拔变化趋势整体为先升高后逐渐降低,而阳坡的地表土壤含水量变化趋势较为平缓;阴坡的地表温度显著低于阳坡,这是由于阳坡光照较强,地表温度较高,地表蒸散较大,导致地表土壤含水量较低,而阴坡光照相对较弱,地表温度较低,地表蒸散较小,导致地表土壤含水量较高;阴坡和阳坡的地表土壤电导率变化趋势与地表土壤水含量的变化趋势相似,阴坡的地表土壤电导率同样是先增加后降低,但阳坡的地表土壤电导率变化幅度比地表土壤含水量的变化幅度大。

由表3可知,阴坡地表土壤水含量、地表土壤电导率、地表温度的变异系数分别为0.37、0.54、0.29;阳坡地表土壤含水量、地表土壤电导率、地表温度的变异系数分别为0.18、0.46、0.06,除了阳坡地表温度的变异系数属于弱变异性以外,阴坡和阳坡相关变量的变异系数均大于0.1且小于1,属于中等变异。总体来说,阴坡三个变量的变异系数均大于阳坡。这主要是因为生长在阴坡的植被类型较多,虽以高大的云杉为主,但在土壤表面生长有各种高度的草本植物,在地表还有苔藓、地衣存在,土壤特性受植被的影响较大;而且随着高度的增加,所能吸收的太阳辐射也增加,导致地表温度和地表土壤含水率的变化幅度较大,坡顶的植被状况与坡底有较大差异。反观阳坡,植被类型比较单一,基本被草本植物覆盖,所以地表土壤含水量和地表温度的变异系数比阴坡小。但阳坡地表土壤电导率的变异系数较大,这可能是因为有当地居民在阳坡进行放牧活动,阳坡土壤受动物影响较大。

2.4 不同土地利用类型地表土壤水分和电导率分布特征

研究区内海拔超过1500 m时主要土地利用类型为草地和林地,农田范围远小于草地和林地。为保证数据对比的一致性,本部分草地和林地的地表土壤水分和电导率数据选自700~1500 m范围内的样本。

由表4可知,耕地、林地、草地的地表土壤含水量相差不足3%,这主要是因为9月16日的降水事件,使得这三种土地利用类型的地表土壤含水量均处于较高水平。林地的地表土壤含水量略低于耕地和草地,其中草地的地表土壤含水量最高。林地的地表土壤含水量最低是因为树木与草本植物相比拥有较深的根系和较大的冠层,所以其蒸腾和耗水较多[25]。另外,草地的根系主要生长在土壤表层,可以更好的保持水分,这使得草地的地表土壤含水量相较于林地和耕地较高。耕地、林地、草地的地表土壤电导率平均值分别为17.36 mS·m^{-1}、13.81 mS·m^{-1}、14.95 mS·m^{-1},与地表土壤含水量情况相似,耕地、林地、草地的地表土壤电导率平均值也相差不大,林地的地表土壤电导率略低于耕地和草地,但耕地的最大。

耕地、林地和草地地表土壤含水量的变异系数分别为15%、19%和15%,地表土壤电导率的变异系数分别为37%、44%和36%。地表土壤水含量和土壤电导率的变异系数均处于10%~100%之间,属于中等变异,且三种土地利用类型的地表土壤水含量和土壤电导率的变异系数均比较接近,但是地表土

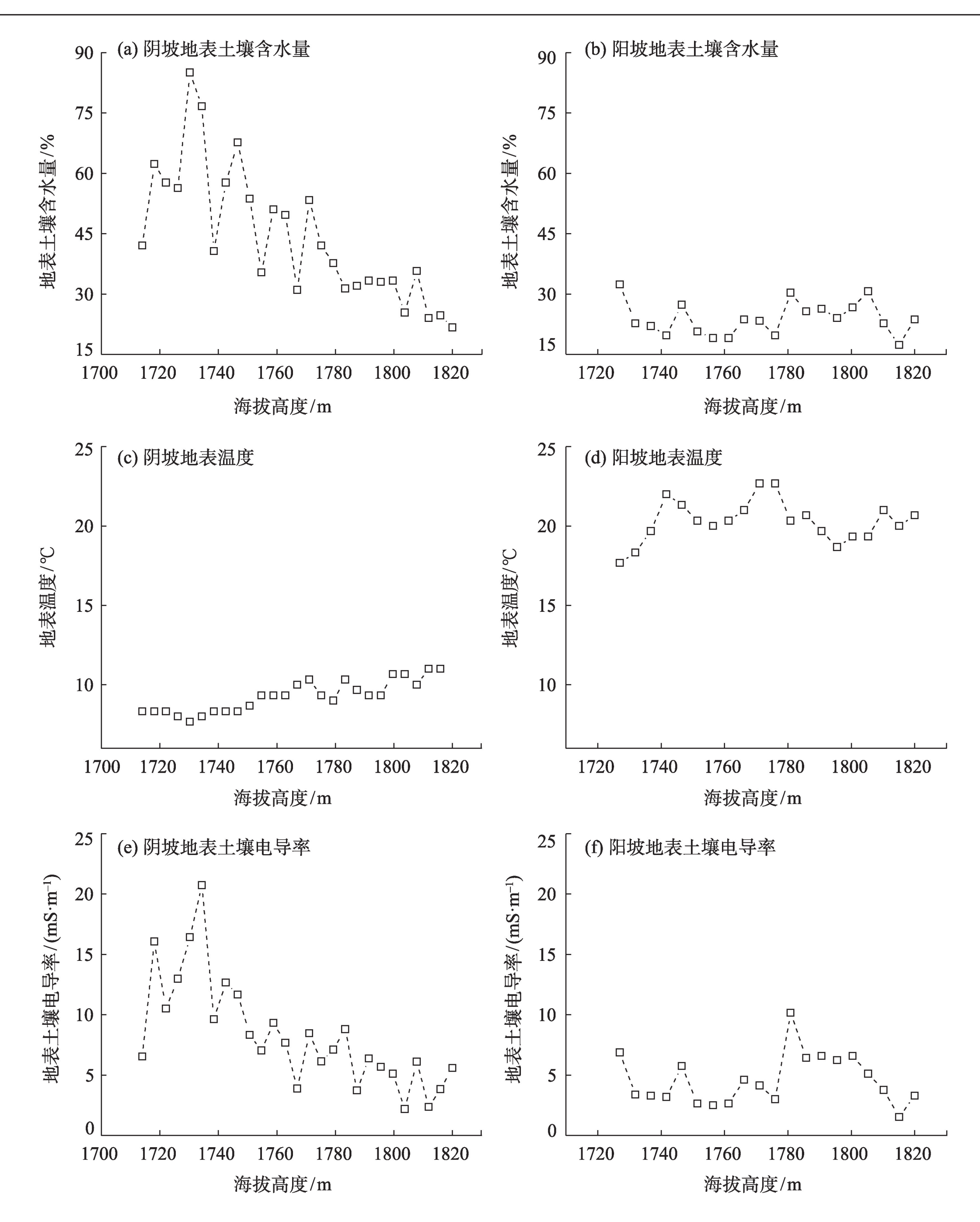


图6 阴坡和阳坡地表土壤水分、地表温度、地表土壤电导率与海拔的关系

Fig. 6 Relationship between surface soil moisture, surface temperature, surface soil electric conductivity and elevation in different slopes

表3 阴坡和阳坡地表土壤水分、地表土壤电导率和地表温度的统计特征值

Tab. 3 Statistical characteristics of surface soil moisture, surface soil electric conductivity and surface temperature in the southern and northern slopes

	最小值		最大值		平均值		标准差		*Cv*	
	阴坡	阳坡	阴坡	阳坡	阴坡	阳坡	阴坡	阳坡	阴坡	阳坡
SW/%	21.6	17.33	85.00	32.33	44.22	23.83	16.50	4.18	0.37	0.18
EC/(mS·m^{-1})	2.17	1.53	20.73	10.17	8.33	4.58	4.47	2.10	0.54	0.46
ST/℃	7.67	17.67	23.33	22.67	9.79	20.28	2.88	1.31	0.29	0.06

注:ST表示地表温度。下同。

表4 不同植被类型地表土壤水分和土壤电导率统计特征值

Tab. 4 Statistical characteristics of surface soil moisture and electric conductivity for different vegetation types

植被类型	样本数	最小值		最大值		平均值		变异系数	
		SW/%	EC/(mS·m⁻¹)	SW/%	EC/(mS·m⁻¹)	SW/%	EC/(mS·m⁻¹)	SW/%	EC/(mS·m⁻¹)
耕地	12	28	7.73	45.33	30.93	37.04	17.36	0.15	0.37
林地	12	26	5.5	50.67	24.03	34.67	13.81	0.19	0.44
草地	12	31.33	7.7	46.33	25	37.19	14.95	0.15	0.36

壤电导率的变异程度要比地表土壤含水量的变异程度大20%左右，林地的地表土壤含水量和土壤电导率的变异程度均高于耕地和草地。

3 讨论

3.1 地表土壤含水量与地表土壤电导率相关性分析

对坡地尺度地表土壤水含量和土壤电导率进行相关性分析，结果如图7所示。阴坡地表土壤含水量和电导率的决定系数R^2为0.81，$P<0.01$；阳坡地表土壤含水量和电导率的决定系数R^2为0.72，$P<0.01$。不论是在阴坡还是阳坡，地表土壤含水量和电导率均存在显著相关性，两者高度正相关。

阿拉图拜小流域地表土壤含水量和地表土壤电导率关系如图7c所示，两者决定系数R^2为0.51，$P<0.01$。而在流域尺度，地表土壤含水量和地表土壤电导率的决定系数R^2仅为0.24（图7d）。由此可以看出，尺度越小，环境因素如人类活动、植被等差异越小，所以地表土壤电导率与地表土壤含水量有较显著的相关关系；而随着研究尺度的扩大，环境要素空间变异增大，当增加至整个流域尺度时，影响地表土壤水和地表土壤电导率的因素空间变化剧烈，导致二者相关性减弱。

3.2 影响土壤水分空间分异的环境因素

影响土壤水分空间分异的环境因素主要包括

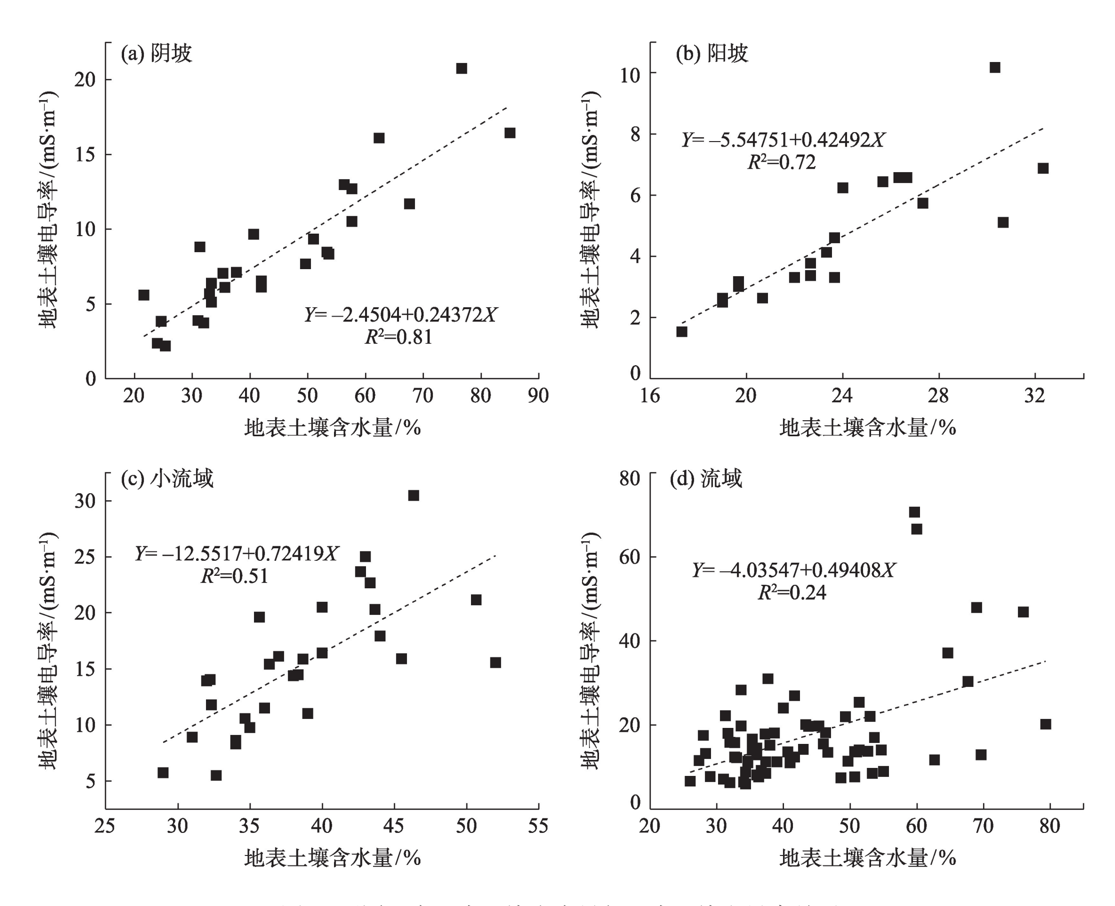


图7 不同尺度地表土壤含水量与地表土壤电导率关系

Fig. 7 Relationship between surface soil moisture and surface soil electric conductivity at different spatial scales

土地利用类型、气象因子、地形因子、土壤特性和人类活动等[26],其中土地利用因子中的植被对土壤水的影响机制分为两个方面,一方面植物叶冠截留降水、蒸腾作用强大会使土壤水分减少;另一方面枯枝落叶层可以增加入渗,减少地表蒸发,且植物根系也能增加水分的下渗[27-28]。不同种类的植物对土壤水分的影响不同,本研究中三种不同土地利用类型的土壤含水率大小依次为草地>耕地>林地,其中林地的土壤含水率最小,这是因为林地蒸腾作用强,会造成土壤水分亏缺[29]。

本研究中涉及的地形因子为坡向和海拔高度。阳坡的太阳辐射比阴坡强,地表温度比阴坡高,地表蒸散强度大,地表土壤水分较低[30]。本研究中阳坡地表温度约为阴坡的2倍,地表土壤水含量平均值仅为阴坡的1/2。本研究中阴坡植被为林地,阳坡为草地,从植被蒸腾的角度来说林地的蒸腾作用比草地要大,阴坡地表土壤水分应小于阳坡,但在坡向的影响下,阴坡太阳辐射小于阳坡,导致阴坡地表温度较低、土壤水分较高,太阳辐射是影响坡地尺度地表土壤水分的主要因素。目前大量关于海拔高度与土壤水分关系的研究表明,土壤水分随着海拔的增高而降低[31-34],这与本研究中流域尺度地表土壤水分随海拔的升高而升高的趋势不同。这是因为这些研究主要针对坡面尺度[31-33],而在坡面上,坡下位置可以接收坡上地表径流和壤中流的补充[32],所以土壤水分随海拔的增高而降低。而本研究中阴坡的地表土壤水分分布与这些研究结果一致,即坡顶地表土壤含水量明显低于坡底。

整体而言,流域尺度地表土壤水分随海拔的升高而升高,一方面是因为土壤水分主要来源于降水,土壤水分的时空变异受降水特征的影响[35],而降水在一定海拔范围内随海拔高度的增加而增加;另一方面由于在本文研究时段内,当巩乃斯河流域海拔增加至2500 m以上时,草地上开始出现小块正在融化的积雪,在积雪周围甚至有积水产生,而牛春霞[36]等在对天山北坡季节性积雪消融对土壤水分变化影响的研究中发现,融雪水的下渗会增加各层土壤层的含水量,且0~30 cm范围内的增加最为明显,郭玲鹏等[37]在中国科学院天山积雪雪崩研究站中进行融雪实验时发现,积雪在控制土壤含水率最大值方面有重要作用,即高海拔处的积雪融水使该地区地表土壤水分较高。

本研究从不同空间尺度较为全面的分析了新疆巩乃斯河谷地带地表土壤水及土壤电导率的空间分布规律,但仍存在采样时间较短,未能分析该地区土壤特性季节变化;空间采样有限,采样路线大致为线状采样等问题。在未来的研究中应重点关注该地区土壤特性的季节变化,并结合遥感技术来进一步分析土壤特性空间分布特征及其影响因素。

4 结 论

本研究利用2019年9月野外实测资料,分析了巩乃斯河谷流域尺度、小流域尺度、坡地尺度地表土壤水分、地表土壤电导率的空间分布特征及其与地形、土地利用类型的关系,主要结论如下:

(1) 流域尺度,根据变异系数 Cv,地表土壤含水量和土壤电导率均呈中等变异;地表土壤含水量随海拔的升高呈先上升后下降趋势,海拔2000 ~ 2500 m范围内地表土壤含水量平均值最高;整体而言,海拔能够解释地表土壤含水量空间变化的44 %。地表土壤电导率在海拔2000 ~ 2500 m范围内平均值最高,其他海拔条件下随海拔升高而下降。

(2) 在巩乃斯河小流域尺度,中间海拔地表土壤含水量低于低海拔和高海拔范围地表土壤含水量;地表土壤电导率则随海拔升高而缓慢下降。地表土壤含水量和地表土壤电导率在小流域尺度下均也呈中等变异。

(3) 坡地尺度,受太阳辐射影响,阴坡和阳坡土壤特征相差较大,地表温度阳坡>阴坡,地表土壤电导率和地表土壤含水量阴坡>阳坡。阴坡地表温度、地表土壤含水量和电导率变异系数均大于阳坡,阴坡和阳坡地表土壤电导率和土壤含水量都存在显著线性关系,且该关系比流域尺度和小流域尺度的密切。

(4) 不同土地利用条件下地表土壤含水量均值大小依次为:草地>耕地>林地,变异系数大小依次为:林地>草地/耕地;地表土壤电导率的均值大小依次为:耕地>草地>林地,变异系数大小依次为:林地>耕地>草地。地表土壤含水量和电导率在三种土地利用方式下均呈中等变异。

参考文献(References):

[1] 杨红, 徐唱唱, 赛曼, 等. 不同土地利用方式对土壤含水量、pH值及电导率的影响[J]. 浙江农业学报, 2016, 28(11): 1922–

1927. [Yang Hong, Xu Changchang, Sai Man, et al. Effects of land use on soil moisture, pH and electrical conductivity[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2016, 28(11): 1922-1927.]

[2] 赵维俊, 孟好军, 马剑, 等. 祁连山哈溪林区森林土壤电导率剖面变化特征[J]. 林业科技通讯, 2018(11): 7-10. [Zhao Weijun, Meng Haojun, Ma Jian, et al. Characteriscs of forest soil conductivity profiles in Haxi region of Qilian Mountains[J]. Forest Science and Technology, 2018(11): 7-10.]

[3] 雷志栋, 胡和平, 杨诗秀. 土壤水研究进展与评述[J]. 水科学进展, 1999, 10(3): 311-318. [Lei Zhidong, Hu Heping, Yang Shixiu. A review of water research[J]. Advances in Water Science, 1999, 10(3): 311-318.]

[4] 宗路平, 角媛梅, 李石华, 等. 哈尼梯田景观水源区土壤水分时空变异性[J]. 生态学杂志, 2015, 34(6): 1650-1659. [Zong Luping, Jiao Yuanmei, Li Shihua, et al. Spatial and temporal variability of soil moisture in water source region of Hani terrace landscape [J]. China Journal of Ecology, 2015, 34(6): 1650-1659.]

[5] 李丽梅, 胡华. 网格尺度上宁夏平原区土壤水分入渗空间变异性分析[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(9): 49-54. [Li Limei, Hu Hua. Spatial variability of soil water infiltration of the grid scale in Ningxia plain[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(9): 49-54.]

[6] Stella J C, Rodríguez-Gonzalez P M, Dufour S, et al. Riparian vegetation research in Mediterranean-climate regions: Common patterns, ecological processes, and considerations for management[J]. Hydrobiologia, 2013, 719(1): 291-315.

[7] Capon S J, Chambers L E, Mac Nally R, et al. Riparian ecosystems in the 21st Century: Hotspots for climate change adaptation? [J]. Ecosystems, 2013, 16(3): 359-381.

[8] 张泉, 刘咏梅, 杨勤科, 等. 祁连山退化高寒草甸土壤水分空间变异特征分析[J]. 冰川冻土, 2014, 36(1): 88-94. [Zhang Quan, Liu Yongmei, Yang Qinke, et al. Analysis of the spatial variability of soil moisture in degrading alpine meadow in the Qilian Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(1): 88-94.]

[9] 柴晨好, 王玉刚, 周宏飞, 等. 干旱区典型绿洲水库库周土壤盐分空间分异及盐岛效应[J]. 生态学杂志, 2018, 37(8): 2445-2452. [Chai Chenhao, Wang Yugang, Zhou Hongfei, et al. Spatial variability of soil salinity and "salt island" effect around oasis reservoir in arid area[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(8): 2445-2452.]

[10] 尹辉, 李晖, 蒋忠诚, 等. 广西果化岩溶区土壤电导率的空间异质性[J]. 中国沙漠, 2014, 34(3): 786-794. [Yin Hui, Li Hui, Jiang Zhongcheng, et al. Spatial variability of soil electric conductivity in typical Karst Area of Guohua, Guangxi, China[J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(3): 786-794.]

[11] 王建栋, 张志华, 杨喜田, 等. 黑河流域土壤理化性质分布特征[J]. 河南农业大学学报, 2020, 54(1): 1-9. [Wang Jiandong, Zhang Zhihua, Yang Xitian, et al. Soil physicochemical properties and distribution characteristics in Heihe River, Northwest China [J]. Journal of Henan Agricultural University, 2020, 54(1): 1-9.]

[12] 安富博, 张德魁, 赵锦梅, 等. 河西走廊不同类型戈壁土壤理化性质分析[J]. 中国水土保持, 2019, 40(6): 42-47. [An Fubo, Zhang Dekui, Zhao Jinmei, et al. Physicochemical properties of different types of Gobi soil in Hexi Corridor[J]. Soil and Water Conservation in China, 2019, 40(6): 42-47.]

[13] 刁二龙, 曹广超, 曹生奎, 等. 祁连山南坡不同土地利用方式下土壤理化性质及空间变异性分析[J]. 西南农业学报, 2019, 32(8): 1864-1871. [Diao Erlong, Cao Guangchao, Cao Shengkui, et al. Analysis of soil physical and chemical properties and spatial variability under different land use patterns in southern slope of Qilian Mountains[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2019, 32(8): 1864-1871.]

[14] 马杰, 李兰海, 刘翔, 等. 伊犁河上游典型草地生态系统氮磷含量及化学计量特征[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2017, 41(3): 7-14. [Ma Jie, Li Lanhai, Liu Xiang, et al. Stochiometry of nitrogen and phosphorus and the content in grassland ecosystem in the upper reaches of Ili River[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2017, 41(3): 7-14.]

[15] 马杰. 巩乃斯河流域典型草地生态学特征及土壤营养元素的空间异质性研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015. [Ma Jie. Spatial Heterogeneity of Ecological Characteristics and Soil-nutrient Elements for the Ttypical Grasslands within the Kunes River Basin [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015.]

[16] 胡汝骥. 中国天山自然地理[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2004: 234-236. [Hu Ruji. Natural Geography of Tianshan Mountains, China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2004: 234-236.]

[17] 王云才. 巩乃斯河流域游憩景观生态评价及持续利用[J]. 地理学报, 2005, 60(4): 645-655. [Wang Yuncai. Recreation-scape ecological suitability evaluation and landscape resources sustainable development: A case study of Kunes River Basin in Xinjiang Uygur Autonomous Region[J]. Acta Geographica Sinica, 2005, 60 (4): 645-655.]

[18] 新源县委史志办. 新源年鉴2012[M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 2013. [Local Chronicles Compilation Office of Xinyuan County. Xinyuan Annals of 2012[M]. Urumqi: Xinjiang People's Publishing House, 2013.]

[19] 徐新良, 刘纪远, 张增祥, 等. 中国5年间隔陆地生态系统空间分布数据集(1990—2010)内容与研发[J]. 全球变化数据学报, 2017, 1(1): 52-59. [Xu Xinliang, Liu Jiyuan, Zhang Zengxiang, et al. A time series land ecosystem classification dataset of China in five-year increments (1990-2010) [J] Journal of Global Change Data & Discovery, 2017, 1(1): 52-59.]

[20] 雷志栋, 杨诗秀, 许志荣, 等. 土壤特性空间变异性初步研究[J]. 水利学报, 1985, 30(9): 10-21. [Lei Zhidong, Yang Shixiu, Xu Zhirong, et al. Preliminary investigation of the spatial variability of soil properties[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1985, 30(9): 10-21.]

[21] 高婷婷, 丁建丽, 哈学萍, 等. 基于流域尺度的土壤盐分空间变

异特征——以渭干河-库车河流域三角洲绿洲为例[J]. 生态学报, 2010, 30(10): 2695-2705. [Gao Tingting, Ding Jianli, Ha Xueping, et al. The spatial variability of salt content based on river basin scale: A case study of the delta oasis in Weigan-Kuqa Watershed[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(10): 2695-2705.]

[22] 陈丽娟, 冯起, 成爱芳. 民勤绿洲土壤水盐空间分布特征及盐渍化成因分析[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(11): 99-105. [Chen Lijuan, Feng Qi, Cheng Aifang. Spatial distribution of soil water and salt contents and reasons of saline soils' development in the Minqin Oasis[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(11): 99-105.]

[23] 白磊, 李兰海, 师春香, 等. 中国天山山区降水特征及其研究进展[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2017, 38(5): 38-48. [Bai Lei, Li Lanhai, Shi Chunxiang, et al. An overview of precipitation characteristics and its research progress in Tianshan Mountains area, China[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2017, 38(5): 38-48.]

[24] Henninger D L, Petersen G W, Engman E T. Surface soil moisture within a watershed: Variations, factors influencing, and relationship to surface runoff[J]. Soil Science Society of America Journal, 1976, 40(5): 773-776.

[25] 石莎, 马风云, 刘立超, 等. 沙坡头地区不同植被结构对沙地土壤水分的影响[J]. 中央民族大学学报(自然科学版), 2004, 13(2): 137-141, 145. [Shi Sha, Ma Fengyun, Liu Lichao, et al. The effect on different vegetation structure to soil water contents in Shapoto region[J]. Journal of the CUN (Natural Sciences Edition), 2004, 13(2): 137-141, 145.]

[26] 邱扬, 傅伯杰, 王军, 等. 土壤水分时空变异及其与环境因子的关系[J]. 生态学杂志, 2007, 26(1): 100-107. [Qiu Yang, Fu Bojie, Wang Jun, et al. Spatiotemporal variation of soil moisture and it's relation to environmental factors[J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(1): 100-107.]

[27] 侯喜禄, 白岗栓, 曹清玉. 刺槐、柠条、沙棘林土壤入渗及抗冲性对比试验[J]. 水土保持学报, 1995, 9(3): 90-95. [Hou Xilu, Bai Gangshuan, Cao Qingyu. Contrast study on soil infiltration capacity and anti-scourability in *Robinia pseudoacacia*, *Caragana microphylla* and *Hippophae rhamnoides* woodlands[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1995, 9(3): 90-95.]

[28] Famiglietti J S, Rudnicki J W, Rodell M. Variability in surface moisture content along a hill slope transect: Rattlesnake Hill, Texas[J]. Journal of Hydrology, 1998, 210(1-4): 259-281.

[29] 李玉山. 黄土区土壤水资源循环特征及其对陆地水分循环的影响[J]. 生态学报, 1983, 3(2): 91-101. [Li Yushan. The properties of water cycle in soil and their effect on water cycle for land in the loess region[J]. Acta Ecologica Sinica, 1983, 3(2): 91-101.]

[30] Western A W, Blosch G. On the spatial scaling of soil moisture[J]. Journal of Hydrology, 1999, 217(3-4): 203-224.

[31] 王军, 傅伯杰, 邱扬, 等. 黄土丘陵区土地利用与土壤水分的时空关系[J]. 自然资源学报, 2001, 16(6): 521-524. [Wang Jun, Fu Bojie, Qiu Yang, et al. Spatial and temporal relationships between land use and soil moisture in hilly area of the Loess Plateau[J]. Journal of Natural Resources, 2001, 16(6): 521-524.]

[32] 邱扬, 傅伯杰, 王军, 等. 黄土丘陵小流域土壤水分时空分异与环境关系的数量分析[J]. 生态学报, 2000, 20(5): 741-747. [Qiu Yang, Fu Bojie, Wang Jun, et al. Quantitative analysis of relationships between spatial and temporal variation of soil moisture content and environmental factors at a gully catchment of the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2000, 20(5): 741-747.]

[33] 赵晓光, 吴发启, 刘秉正, 等. 黄土高原坡耕地土壤水分主要受控因子研究[J]. 水土保持通报, 1999, 19(1): 3-5. [Zhao Xiaoguang, Wu Faqi, Liu Bingzheng, et al. Effectsof primary factors on soil moisture in cultivated slopeland[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1999, 19(1): 3-5.]

[34] Hawley M E, Jackson T J, Mc Cuen R H. Surface soil moisture variation on a small agricultural watershed[J]. Journal of Hydrology, 1983, 62(1-4): 179-200.

[35] Qiu Y, Fu B, Wang J, et al. Spatial prediction of soil moisture content using multiple-linear regressions in a gully catchment of the Loess Plateau, China[J]. Journal of Arid Environments, 2010, 74(2): 208-220.

[36] 牛春霞, 杨金明, 张波, 等. 天山北坡季节性积雪消融对浅层土壤水热变化影响研究[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(11): 131-136. [Niu Chunxia, Yang Jinming, Zhang Bo, et al. Influence of seasonal accumulated snow melting on the moisture and heat of shallow soil layer in northern slope of Tianshan Mountain[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(11): 131-136.]

[37] 郭玲鹏, 李兰海, 徐俊荣, 等. 气温变化条件下融雪速率和土壤水分变化的同步观测试验[J]. 干旱区研究, 2012, 29(5): 890-89. [Guo Lingpeng, Li Lanhai, Xu Junrong, et al. Experimental study on simultaneous observation of snowmelt and soil moisture content under air temperature increase[J]. Arid Zone Research, 2012, 29(5): 890-89.]

Spatial distribution of surface soil moisture and soil conductivity in the Kunes Valley

FENG Ting[1,2,3], HUANG Fa-rong[1,3,4,5], HAO Jian-sheng[1,2,3], LI Lan-hai[1,2,3,4,5]

(1. *State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi* 830011, *Xinjiang, China*; 2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*; 3. *Ili Station for Watershed Ecosystem Research, Chinese Academy of Sciences, Xinyuan* 835800, *Xinjiang, China*; 4. *Key Laboratory of Water Cycle and Utilization in Arid Zone, Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi* 830011, *Xinjiang, China*; 5. *Research Center for Ecology and Environment of Central Asia, Chinese Academy of Sciences, Urumqi* 830011, *Xinjiang, China*)

Abstract: Soil moisture and soil conductivity are important factors influencing vegetation growth and agricultural production. Traditional methods for measuring soil moisture and soil electric conductivity are costly, leading to a lack of research on these two soil properties at different spatial scales in the mountainous basin. In this study, the distributions and influencing factors of surface soil moisture and soil electric conductivity were analyzed at different spatial scales during autumn in the Kunes Valley in the western Tianshan Mountains. To do this, data of surface soil moisture and electrical conductivity was measured and compared. The results showed four main findings. (1) In the Kunes Valley, surface soil moisture increased significantly ($P < 0.01$) with an increase in altitude at the basin scale, with an increase rate of 10% km^{-1}. However, in the small Alatubai watershed, the surface soil moisture first rises and then decreases as the elevation increases. Average soil electrical conductivity at the basin scale is 17.51 $mS \cdot m^{-1}$, with no salinization in the surface soil as a whole. Yet, surface soil electric conductivity of some points in the 2000–2500 m altitude zone is greater than 35 $mS \cdot m^{-1}$, indicating that mild salinization exists in the corresponding zone. (2) Under different slopes, there are large differences in surface soil moisture and electrical conductivity. Surface soil moisture at the northern slope (average: 44.22%) is greater than that at the southern slopes (average: 22.83%), while surface soil electrical conductivity at the southern slope (average value: 8.33 $mS \cdot m^{-1}$) is greater than that at the northern slope (average value: 4.58 $mS \cdot m^{-1}$). (3) Because the influencing factors of soil property were more complex at the larger spatial scale, the correlation between surface soil moisture and surface soil conductivity becomes weaker as the spatial scale enlarges. (4) The order of surface soil moisture for different land use types is: grassland (37.19%) > cultivated land (37.04%) > forest land (34.67%); the order of surface soil electric conductivity is: cultivated land (17.36 $mS \cdot m^{-1}$) > grassland (14.95 $mS \cdot m^{-1}$) > forest land (13.81 $mS \cdot m^{-1}$). Under the influence of altitude, aspect, and land use type, the surface soil electrical conductivity and soil moisture in the Kunes River Basin shows moderate variations. This study provides useful information for rational water and soil resource management, as well as ecological environment protection in the Kunes River Basin.

Keywords: surface soil moisture; surface soil electrical conductivity; spatial distribution; Kunes River Basin